

锂能源金属矿产基地深部探测技术示范项目进展*

王登红¹, 孙艳^{1**}, 周四春², 梁婷³, 付勇⁴, 付小方⁵, 郝雪峰⁵, 三金柱⁶,
刘喜方¹, 侯可军¹, 郭唯明¹, 田世洪⁷, 李超⁸, 孔维刚¹, 马圣钞⁹, 郭旭吉⁶

(1 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 2 成都理工大学, 四川成都 610059; 3 长安大学, 陕西西安 710054; 4 贵州大学, 贵州贵阳 550025; 5 四川省地质调查院, 四川成都 610081;
6 新疆维吾尔自治区有色地质勘查局, 新疆乌鲁木齐 830000; 7 东华理工大学, 江西南昌 330013;
8 国家地质实验测试中心, 北京 100037; 9 五矿勘查开发有限公司, 北京 100010)

摘要 锂作为 21 世纪的能源金属, 已经并仍将在未来的能源结构中占有重要地位。中国锂资源对外依存度将近 75%, 采矿深度普遍不超过 300 m, 深部探矿势在必行。为提高中国锂矿深部探测能力, 储备一批深部探测技术方法, 2017 年国家重点研发计划设立锂能源金属矿产基地深部探测技术示范项目。项目由中国地质科学院矿产资源研究所牵头, 共十余家单位、78 位项目成员参加。通过产学研紧密结合, 在川西甲基卡、新疆卡鲁安及四川黄金口等地区深入开展了典型矿床和深部探测技术组合方法等的研究, 对贵州务正道地区铝土矿、中国西南地区广泛分布的绿豆岩中锂的富集机制开展了深入研究, 在锂的成矿理论、新类型锂资源找矿探索、深部探测技术方法组合等方面取得了一系列新进展, 圈定了一批远景区和靶区, 有力保障了国家锂能源资源安全。

关键词 地质学; 锂; 能源金属; 深部探测; 技术示范; 进展

中图分类号: P618.71

文献标志码: A

Progress of the deep exploration technology demonstration project for lithium energy metal mineral base

WANG DengHong¹, SUN Yan¹, ZHOU SiChun², LIANG Ting³, FU Yong⁴, FU XiaoFang⁵, HAO XueFeng⁵,
SAN JinZhu⁶, LIU XiFang¹, HOU KeJun¹, GUO WeiMing¹, TIAN ShiHong⁷, LI Chao⁸, KONG WeiGang¹,
MA ShengChao⁹ and GUO XuJi⁶

(1 MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China;
2 Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan; 3 Changan University, Xi'an, 710054, Shaanxi; 4 Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou; 5 Sichuan Institute of Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan; 6 Xinjiang Uygur Autonomous Region Bureau of Nonferrous Metals Geological Exploration, Urumqi 830000, Xinjiang; 7 East China Institute of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi; 8 National Geological Experiment and Testing Center, Beijing 100037, China;
9 Minmetals Exploration and Development Co. Ltd, Beijing 100010, China)

Abstract

As an energy metal in the 21st century, lithium has played an important role in the future energy structure and the significance will continue in the future. However, the external dependence of lithium resources in China is nearly 75%, and the mining depth is generally less than 300 m, deep prospecting is imperative. In 2017, the State Key Research and Development Program set up a project "Demonstration of deep exploration technology in

* 本文得到国家重点研发计划(编号:2017YFC0602700、2017YFC0602701)资助

第一作者简介 王登红,男,1967年生,博士,研究员,矿床学专业。Email:wangdenghong@vip.sina.com

** 通讯作者 孙艳,女,1981年生,博士,正高级工程师,构造地质学专业。Email:15225179@qq.com

收稿日期 2021-03-18;改回日期 2021-07-06。赵海杰编辑。

lithium energy metal mineral base". Headed by Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, with 10 institutions and 78 members of the project team, and in close collaboration with the mining enterprises, we carried out the study on lithium metallogenic regularities and multiple deep detection approaches in Jiagika of Sichuan, Kaluan of Xinjiang, Huangjinkou of Sichuan, such as the theory of lithium mineralization and exploration approaches for new types of lithium resources. We have made a series of new progress, identified a number of high prospective areas and target areas, that is crucial for securing the country's lithium resources supply.

Key words: geology, lithium, energy metal, deep probe, technical demonstration, project progress

2017年,中国共产党第十九次全国代表大会首次提出了“高质量发展”的新要求。党的十九大报告中明确提出“加快生态文明体制改革,建设美丽中国”,发展“清洁能源产业,推进能源生产和消费革命”。锂作为21世纪的能源金属,在未来的能源结构中占有重要地位,但中国锂资源对外依存度将近75%,采矿深度普遍不超过300 m,深部探矿势在必行。为此,国家重点研发计划于2017年全面启动《锂能源金属矿产基地深部探测技术示范》项目。该项目旨在从能源金属的角度,科学厘定锂矿优势类型,正确评价甲基卡、卡鲁安等重点地区的锂资源深部潜力,初步查明锂矿资源分布规律和成矿规律,探索了小于3000 m深锂矿的资源勘查前沿技术,配以钻探验证,新发现大型资源基地1~3个,值得综合评价的远景区3~4处。通过3年多的艰苦努力,以中国地质科学院矿产资源研究所挂帅,新疆有色地勘局、四川地调院、贵州大学、长安大学、成都理工大学、国家地质实验测试中心、五矿勘查开发有限公司、西南能矿集团等十个单位参加,共计78位项目组成员,齐心协力,共同努力,理论联系实际,产学研紧密结合,深入开展了锂矿成矿规律和深部探测技术组合方法等创新研究,并在靶区验证、新类型锂矿探索找矿等方面取得了一系列新进展,为中国锂能源金属矿产资源的深部勘查评价、开发利用及高端产业发展指出了方向,为锂能源金属高质量发展提供了依据。文章即是该项目成果的深化总结。

1 成矿理论创新

1.1 厘定了锂矿的优势矿床类型,总结了成矿规律

中国锂矿的主要矿床类型包括硬岩型锂矿、卤水型锂矿和沉积型锂矿。硬岩型锂矿包括花岗伟晶岩型、碱性岩型、细晶岩型等,卤水型包括地表盐湖卤水型和地下卤水型,沉积型包括与铝土矿有关的、与黏土岩有关的及与砂岩有关的锂矿,其他还有油

田卤水型、热泉型、热液型、煤系地层伴生型等多种次要类型。锂矿的优势类型是伟晶岩型和地表盐湖卤水型,近年发现的产于花岗岩中的江西九岭式以磷锂铝石、锂云母为特点的硬岩型锂矿具有粒度偏细、品位低但共伴生矿种多、规模大的特点,前景看好。应该指出,类似于斑岩型铜矿,九岭式岩体型锂矿一旦得到工业开发,有可能改变锂矿的资源格局(王成辉等,2019)。

作为中国优势矿床类型的硬岩型锂矿以印支期尤其是印支晚期—燕山早期大规模成矿为特点,并在青藏高原北缘形成西昆仑大红柳滩、青川交界的扎乌龙、川西阿坝州的可尔因、甘孜州的甲基卡4大锂矿资源基地。研究揭示,新疆北部阿尔泰的卡鲁安和可可托海形成于同一时期,与中国大地构造演化历史及具体的构造背景密切相关。印支运动导致了北方大陆与南方大陆的拼合,南北向的挤压形成了一系列东西向造山带,而造山运动之后的相对稳定的构造转折,尤其是构造应力场从南北向挤压改为东西向挤压的根本性变化,导致了不同构造层之间张性空间的产生,为含锂沉积岩的深埋、重熔、折返、占位及充分的结晶分异创造了条件(李尚等,2018;凤永刚等,2019; Dai et al., 2019; Ding et al., 2019; Feng et al., 2019; 2020)。

作为第二种优势矿床类型的西藏扎布耶式的卤水型锂矿,因直接结晶出碳酸锂——扎布耶石而闻名于世,但其分布有限。青海盐湖中的硫酸盐锂矿虽然Mg/Li值较大,但它具有品位高的特点,且工业提取实验已成功,潜力极大。

沉积型锂矿资源,在美国以油田卤水和砂岩型锂矿为重点(于枫等,2019),中国与之不同,锂在山西、河南及贵州等地的铝土矿尤其是矿层顶底板或夹层中明显富集(铝质泥岩含Li可达0.35%)。项目组通过对上扬子成矿亚省铝土矿中伴生锂资源的系统研究(西南能矿集团提供了数千米岩芯实物供本项目研究),发现贵州务正道铝土矿矿集区锂的富集

程度最高,伴生的氧化锂超过182万t,故以新民铝土矿床为重点开展了典型解剖(龙克树等,2019),查明了锂的赋存状态,发现了富锂岩性组合的平面展布特征、厚度变化特征与矿体的平面展布特征及厚度变化特征之间存在类似性和关联性,揭示了“有铝有锂”的伴生规律;富锂岩性组合厚度有沿倾向方向逐渐减小的趋势,厚度在地表浅处较大,但最大厚度出现在平行于含铝岩系露头的300~600 m的平距范围内,在秦岭以北的豫西地区也出现与铝土矿共伴生的锂资源区域性的富集,称为豫西式伴生锂矿,推测其成矿物质来源可能与其西南侧秦岭造山带中的含锂地质体(包括灰池子岩体及其周边的含锂伟晶岩)有关。

项目组首次在湖北柘坪锑矿区发现了浅成低温热液型锂矿床,尽管尚未构成工业矿体,但为寻找新类型的矿床提供了线索,像Sb-Li这样的新类型矿化组合是前所未有的。锂赋存在低温成因的绿泥石类矿物中,说明锂是可以通过热液而不只是熔浆、热流体的高温方式迁移富集的(郭唯明等,2019a)。这一发现弥补了锂矿成因类型的一个空白,为深入研究砂岩型、黏土型、铝土矿型等沉积型锂矿的成因机制提供了新的切入点,也为“多旋回深循环内外生一体化”锂矿成矿理论的建立提供了重要依据。

以往对热泉型锂矿有所关注,但一直未引起重视。通过对滇西南地区以腾冲为代表的热泉型锂矿进行重新调查研究,项目组发现每年从泉水中流失的锂金属量可达530 t。这说明热泉型锂矿的成矿效能是很高的;另一方面,含锂的热泉水是珍贵的锂资源,应该加以重视。是否可以加工成含锂矿泉水,值得探讨研究。另一方面,腾冲一带的热泉水中Li与Be、Rb、Cs、W、Cu、Sb等岩浆热液型元素在含量上呈正相关关系,说明锂等成矿物质来自于深部,成因上属于跟岩浆热液有关的内生外成型锂矿,与蒸发成因卤水型锂矿明显不同(郭唯明等,2019b)。鉴于中国西南三江地区热泉广泛分布,热泉型稀有金属将是一种具有重要理论和现实意义的潜在资源,值得重视。

1.2 创立“多旋回深循环内外生一体化”成矿理论,提出了预测准则

世界范围内的锂矿主要有卤水型和硬岩型2大类,二者具有不同的成矿机制,卤水型属于外生矿床,硬岩型属于内生矿床。项目组提出的“多旋回深循环内外生一体化”成矿理论(图1)(被作为地质科

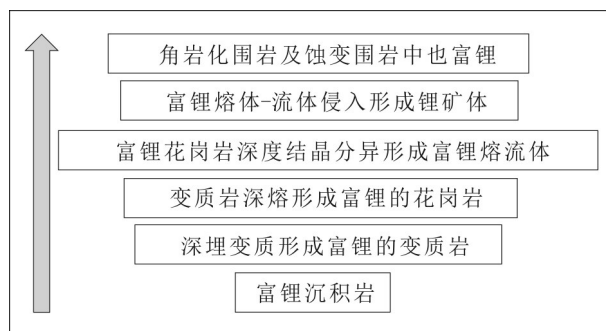


图1 多旋回深循环内外生一体化锂成矿理论概念图
Fig. 1 Conceptual map of multi cycle deep cycle endogenous and exogenous integration lithium mineralization theory

技创新收录于自然资源部公开发布的《2019年全国地质勘查成果通报》),是将外生成因与内生成因锂矿联系起来作为整体考虑,即认为早旋回沉积成因或者在沉积岩中初步富集的锂,在大地构造演化的不同阶段,通过沉积岩的埋藏变质转变为板岩、片岩、片麻岩、混合岩,乃至花岗岩,锂在这一复杂的过程逐步富集,再经过花岗岩岩浆的结晶分异作用形成富含锂的熔流体(即流动性很强的熔体),从而形成硬岩型锂矿。硬岩型锂矿及其他含锂的地质体(包括含锂的变质岩和侵入岩)剥蚀出露地表之后又为沉积型锂矿的形成提供物质来源,开启新的构造-成矿旋回(王登红等,2017)。这样,内生成矿作用和外生成矿作用联系起来了,成岩作用与成矿过程联系起来了,不同类型锂矿的成矿背景与大地构造格局与演化历史结合起来了,从而极大地开拓了新的研究领域,深化了锂的成矿理论,拓宽了找矿思路,拓展了找矿前景。比如,四川盆地深部卤水中的锂来自于火山喷发作用形成的绿豆岩,而从绿豆岩中转移到盆地卤水中的锂在数量上应遵循物质不灭的原则,而转移的效率以及聚集成矿的程度取决于能量(包括温度场、压力场和水溶液的循环能力),锂最终在哪个空间部位、哪个时间段聚集并保留下来(重新溶解进入水溶液体系),则取决于有序的时空结构(即地层、构造等的有利组合)。因此,基于“多旋回深循环内外生一体化”成矿理论的成矿预测准则,就可以回归到“物质不灭,能量守恒,时空无限但有序”。这样的成矿预测准则具有普遍适用性,也适用于其他矿种,但不同矿种以及同矿种的不同类型,要具体问题具体分析。

可以说,沉积过程完成了锂的首次富集,花岗岩

化完成了锂的二次富集,伟晶岩化完成了锂的第三次富集。这三次富集过程并非在相同的、单一的构造背景下同时完成,而是多旋回构造事件的产物。对于卤水型锂矿来说,含矿花岗岩风化剥蚀的产物可以成为其物质来源,即“内生外成”。对于硬岩型锂矿来说,黏土岩或者其他含锂的沉积岩经过变质重熔,可以形成硬岩型锂矿,即“外生内成”。也就是说,卤水中的锂有可能是深部热卤水与地表花岗岩风化后被沉积盆地中的黏土矿物吸附而富集的锂的含量,而不只是由蒸发作用浓缩的。富含锂的沉积岩经过深埋、重熔、花岗岩化以及结晶分异也可以形成内生成因锂矿床,二者是可以循环往复地进行的。

对于具体的锂矿类型来说,卤水型锂矿一般认为是蒸发沉积成因,但本次研究认为,除了蒸发作用之外,来自地下深部(而不是地表)的热液、热泉的补给也非常重要,甚至可以形成独立的热泉型锂矿(如云南腾冲一带);对于硬岩型锂矿,一般认为是岩浆结晶分异形成的,但本次研究认为,熔流体的充填、交代作用也非常重要,甚至有可能超过结晶分异作用。结晶分异形成的稀有金属矿床往往品位不高,难以工业化开采,而充填在层间破碎带和断裂裂隙中的层状、透镜状、脉状矿体才是工业锂矿的主体,无论是新疆的可可托海还是四川的甲基卡,也无论是加拿大的坦科(Tanco)还是澳大利亚的格林布什(Greenbushes),均存在大规模充填交代成因的证据,而结晶分异只是造成了矿体、矿脉内部的分带性,或者是改变了稀有金属元素的空间分布格局,并不制约资源量的大小。因此,结晶分异和充填交代是形成硬岩型锂矿的两大成矿作用,互相弥补,各有贡献,可以同时存在,也可以存在时间差或者各自成矿,可以在空间上重叠(如早阶段充填形成的矿脉被晚阶段流体交代,或者热流体在充填进入某一空间之后再慢慢发生结晶分异),也可以不重叠(如在岩体附近以结晶分异为主,远离岩体则以充填交代为主)。

1.3 提出深部成矿机制的构造模式(组合),拓展深部资源找矿前景

项目组通过将青藏高原现代正在形成的浅水卤水型锂矿与四川盆地深埋藏卤水型锂矿的对比研究,重点阐明了盐湖深部锂等成矿物质的来源与富集机制,初步形成了小于3000 m卤水型锂矿的勘查技术。四川盆地东北部绿豆岩的年代学研究表明,平洪村等地的含锂绿豆岩与峨眉山大火成岩省主喷

发事件之后的幕式岩浆活动有关。峨眉地幔柱活动的岩浆热事件不但导致四川盆地热流值升高,加速了古海水的蒸发速度,而且为深部卤水成矿提供了成矿物质的补给及其他有利条件。三叠纪地层中发育多层绿豆岩,表明四川盆地周缘发生了多次酸性岩浆喷发,为深部卤水提供了大量成矿物质(马圣钊等,2019)。

在四川盆地东北部的黄金口示范区,根据深度达3602.38 m的ZK601钻孔和深度为3200 m的ZK001钻孔资料,系统采集了岩芯、岩屑样品。前期采集的绿豆岩的 $w(\text{Li})$ 最高可达 663×10^{-6} (孙艳等,2017),说明其可作为卤水型锂矿的物质来源。绿豆岩是多期次喷发的产物,其锆石年龄为249.2 Ma(平洪村剖面)和225.2 Ma(谢家槽剖面),说明峨眉地幔柱在大规模活动之后仍有多期次火山喷发(鞠鹏程等,2020),从而提出了“持续蒸馒头-间断式开锅模式”,即在深部岩浆房持续向浅表传输热量的同时,伴随有间歇性的火山喷发,锂随着火山物质喷发至地表并区域性弥散于盆地之中,为卤水型锂矿的形成奠定了物质基础。

1.4 建立“五层楼+地下室层脉组合”勘查模型,实现了多样化含矿标志识别的体系化

中国对锂辉石伟晶岩的成因认识主要是基于新疆可可托海,可可托海3号脉的“草帽”形状被写入教科书而深入人心。实际上,伟晶岩脉的产出具有多样性,主要取决于围岩条件、构造条件和岩浆岩侵入条件等。在四川甲基卡和马尔康一带,垂直于三叠纪的伟晶岩脉和平行于地层的伟晶岩同时产出,从而构成“层脉”组合,其构造条件主要是岩浆-热穹窿构造形成过程中产生的法线方向的张性断裂和顺层产出的层间破碎带,二者的组合与南岭石英脉型钨矿区的“五层楼+地下室”模式在构造机制上是一致的,因此也称为“五层楼+地下室层脉组合”模式。对于这一模式的深入理解,可以转化为“五层楼+地下室层脉组合”的勘查模型(王登红等,2017),即在产状直立或切层伟晶岩脉出露的地区要注意寻找深部顺层的伟晶岩脉,而当顺层伟晶岩脉大面积出露时,意味着剥蚀程度很高,稀有金属的矿种组合可能会发生转变,从相对低温的锂矿带转为以铌钽为主的高温矿带。以这样的模式来分析新疆阿尔泰的伟晶岩型稀有金属的找矿前景,既别开生面,又有助于拓展思路。比如,新疆大喀拉苏矿区的近水平产出的伟晶岩就是以铌钽为主而不是以锂为主,很大程

度上由于剥蚀程度较高所致;清河县喀英德等地的垂直矿脉分布区,则应加强对深部或外围近水平或顺层伟晶岩脉的勘查。

除了锂同位素之外,氢氧同位素、铅-氧同位素也可以作为识别含矿地质体的重要标志。例如,新疆卡鲁安矿区含矿伟晶岩的铅同位素组成($\epsilon_{\text{Hf}}(t)$)变化范围小且集中在0附近,与其不同,外围伟晶岩变化范围大且为正值($\epsilon_{\text{Hf}}(t)=0\sim 10$),与花岗岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值一致;四川甲基卡伟晶岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值约为-5(且含矿伟晶岩与非矿伟晶岩难以区分),而二云母花岗岩则比较分散($\epsilon_{\text{Hf}}(t)=-35\sim 10$,刘涛等,2020)。可见,不同地质体 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 明显不同。

2 技术创新

在重点矿区的示范过程中,针对不同类型、不同工作程度、不同深度的远景区,创新深部探测的技术方法组合,也是项目组研究的重点。相对于其他稀有金属矿床,锂矿比较复杂但特色鲜明,卤水型和硬岩型锂矿、东部盆地区和西部青藏高原区、可尔因加达新矿区和新疆可可托海老矿区、川东北黄金口3000 m深度与川西北甲基卡500 m深度的锂矿,找矿技术方法上是完全不一样的,需要博采众长。尽管“技术”被释义为“人类在认识自然和利用自然的过程中积累起来并在生产劳动中体现出来的经验和知识,也泛指其他操作方面的技巧”,“方法”则被释义为“关于解决思想、说话、行动等问题的门路、程序等”(与方式、步骤等概念近义),各有侧重,但二者往往难以区分,实际上也不能割裂。因此,将技术与方法方面的创新合并在一起可能更合适。

2.1 创新了一系列针对锂矿的分析测试技术,为理论创新和地质找矿提供了技术支撑

如何查明锂矿成矿物质的来源?如何查明锂在地球不同层圈尤其是浅部地壳中的物质循环轨迹?如何查明锂最终聚集定位成矿的时间节点和空间部位?这就需要创新测试分析技术。近年来,同位素年代学、非常规同位素以及单个流体包裹体等测试技术迅猛发展,为矿床学的研究提供了新的技术武装。那么,对于锂矿尤其是作为能源金属的锂矿,从查明成矿机制和指导找矿两个角度来考察,需要发展什么新的测试技术呢?

在查明铌钽矿蜕晶质化成因机制的前提下,本次研究:①建立了其U-Pb同位素定年方法,解决了

伟晶岩中锆石因普遍蜕晶质化带来的难以准确定年的难题,并获得新疆大喀拉苏矿区229.9~228.2 Ma的稀有金属矿物的结晶年龄,证明了以往利用白云母Ar-Ar法测定的印支期成矿的认识,为成矿规律的总结提供了直接依据;②采用飞秒激光剥蚀系统与电感耦合等离子体质谱联用技术,建立了一种采用ICP-AES快速准确测定锂矿石样品中锂含量的分析方法;③除了建立单柱纯化MC-ICP MS测定锂同位素的新方法之外,还建立了锂辉石微区原位锂同位素分析方法,不需要溶液法繁杂的化学前处理流程,具有快速、低成本、高空间分辨率的特点;④建立了铝土矿中锂同位素分离提纯的新方法,拓展了锂同位素的研究领域和使用范围;⑤建立了“X荧光+地气”联袂探测伟晶岩稀有金属矿的新方法,初步实现了对3000 m深度锂矿源层信息的直接获取;⑥建立了锂矿岩芯XRF测量与识别的技术方法及锂矿区土壤金属活动态提取的新方法;⑦建立了碳酸盐岩硼同位素测试的新方法。

铌钽铁矿定年和锆石定年获得的新资料认为新疆卡鲁安的伟晶岩形成于205 Ma前后,而哈龙岩体形成于407.9 Ma,二者相差200 Ma,不存在直接的成因联系。卡鲁安成矿岩体不是哈龙岩体,应该是隐伏的未知岩体,从而避免了找矿方向的误判。

2.2 查明锂及锂同位素的分布规律,重点建立“以锂找锂”的技术路线及配套方法体系

“以锂找锂”是本次研究提出的最重要的技术路线。一方面是利用同位素测试技术来查明不同地质体中锂同位素的组成及其空间分布规律,进而分析成矿物质——锂的来源、运移及其聚集的物质迁移轨迹,以帮助发现矿体(王登红等,2018;李贤芳等,2019)。比如,在四川甲基卡矿区新三号脉,通过不同钻孔锂同位素组成的系统测定,查明成矿物质是自西向东迁移的,与钻探结果吻合。据此,在马尔康加达矿区也对地表伟晶岩脉的锂同位素组成进行了系统测定,结果同样发现其同位素组成是具有方向性变化规律的,进而结合其他地质依据布设钻孔均钻遇锂矿体;另一方面,通过钻探等技术手段探获锂矿体之后,还要查明其锂同位素组成,尤其是要查明 ^6Li 最富集的地段,为今后高质量发展、高端利用锂资源提供地质依据。目前探明的情况是,四川甘孜州的甲基卡新三号脉和阿坝州的加达及觉坝3个硬岩型锂矿,是世界上已知最富集 ^6Li 的矿区,值得高度重视,因为 ^6Li 是可控核聚变的关键原材料,国

家在规划开发时应该结合核工业发展的需要,深入研究是否有必要实施保护性开采,至少应该区别对待。

以锂找锂的技术路线可概括为: $\delta^7\text{Li} \rightarrow \text{锂} \rightarrow {}^6\text{Li}$ 。

通过示范研究发现,四川甲基卡矿区新三号脉的 $\delta^7\text{Li}$ 普遍小于0, $\delta^7\text{Li}_{\text{矿脉直接围岩片岩}} < \delta^7\text{Li}_{\text{锂辉石}} < \delta^7\text{Li}_{\text{花岗岩}}$ (Zhang et al., 2021)。这就为利用锂同位素组成指导找矿提供了依据,即当发现片岩(包括红柱石片岩和堇青石片岩)出现锂同位素负异常时就应该高度警惕周围是否存在矿脉。新三号脉的锂同位素组成具有分带性,自北向南、从东向西, $\delta^7\text{Li}$ 越来越偏小,小于0,意味着成矿物质可能是自南西北东方向运移的。这就为下一步的找矿指出了方向。而这一现象在新疆卡鲁安不一样,卡鲁安807和808号脉的 $\delta^7\text{Li}$ 变化于3.48‰~5.95‰,黑云母石英片岩为2.99‰~3.04‰,哈龙岩体为-1.78‰~-1.74‰,意味着哈龙岩体并非成矿物质的源区。对同一条脉,如规模最大的650号脉,其南侧的 $\delta^7\text{Li}$ (-2.8‰~0.5‰)小于北侧(2.3‰~3.2‰),可能说明是自北向南运移的。四川加达矿区的锂同位素组成也具有明显的方向性,指示远离可尔因大岩基的北东方向才是成矿物质的来源方向,意味着北东侧存在隐伏岩体。当然,对于锂同位素的分馏机制还需要深入研究,其分馏机制和影响因素也是多方面的。无论是甲基卡还是卡鲁安,有一个共性,即含矿伟晶岩脉周围的围岩(片岩)富集 ${}^6\text{Li}$,即 $\delta^7\text{Li} < 0$;而含矿伟晶岩的 $\delta^7\text{Li}$ 在统计意义上小于无矿伟晶岩,这也可以作为找矿标志。

此外,锂同位素在解决花岗岩和伟晶岩的岩浆源区方面也发挥重要作用,是稀有金属伟晶岩矿床成因研究的重要技术手段。比如,四川康定甲基卡和河北兴隆麻地是2个完全不同大地构造背景及成矿期次形成的伟晶岩型矿床,二者具有截然不同的锂同位素组成。在四川甲基卡,富锂的三叠系在构造演化过程中发生部分熔融,导致锂元素重新分配,并因同位素效应导致各矿物中锂同位素组成发生差异,从而造成锂同位素分馏,说明构造演化与源区物质成分的差异影响了新生岩浆及由新生岩浆结晶分异出来的成岩成矿熔体-流体的全岩锂同位素组成。在河北兴隆麻地,稀有金属花岗岩围岩地层的锂同位素组成与上地壳相当,但花岗岩体锂同位素组成为正值,代表了普通(非矿)伟晶岩区地层、花岗岩体与伟晶岩的基本情况。在西藏当雄错,锂同位素示

踪研究结果表明,盐湖卤水锂的物质来源主要为热水携带的深部物质,而拉果错盐湖中的锂可能来自于其南部侵入岩体的风化剥蚀。这样,通过查明伟晶岩型和卤水型锂矿锂同位素的分布规律,形成锂同位素示踪找矿的技术方法,且应用这样的方法和技术路线在四川马尔康取得了找矿突破(图2),探得加达和加达南的锂辉石矿床均为大型或接近大型规模(已经钻探控制)。

2.3 土壤金属活动态提取-地气测量-植物地球化学测量-室内模拟-钻探验证深穿透地球化学测量技术方法体系,为千米深度定位预测提供了新方法

深穿透地球化学测量是本次深部探测的另外一项关键技术,实际上也是技术创新组合,既有原始创新,也有集成创新。其中用到了目前在其他矿种探矿过程中也采用的技术路线和相对成熟的方法,也有本次研发过程中新提出来的技术路线、技术方法及方法的组合模式。不同的方法是否使用得当,结果也不同。比如,针对“地气”测量,理论或者说基本原理是一致的,但是,由周四春教授提出的方法组合与由梁斌教授提出的方法组合是不一样的,分别称为ZSC技术与LB技术,前者侧重于X荧光(探测地表出露点)与地气测量(隐伏矿体垂向定位)的联袂组合,可以获取3000 m尺度矿源层的含锂信息;后者针对通过物探已经发现的高阻体,采取活动态金属弱信息提取技术,结合植物化学测量技术来开展隐伏脉体的含矿性评价(Xu et al., 2019;耿艳等, 2019;刘婷等, 2019;王秋波等, 2020)。这2种方法各有特点,分别在四川盆地黄金口含锂卤水示范区、新疆卡鲁安伟晶岩型锂矿示范区以及四川甲基卡硬岩型锂矿示范区得到了检验,获得了一大批信息,为钻探验证提供了依据。其中,ZSC技术设计了6种地气迁移的模型,开展了“蒸馒头模式”的模拟实验,通过开展模拟实验与天然矿体的类比实验,充分了解了地气物质的迁移规律及地气物质的组分特征、形貌、结构等,夯实了深穿透地球化学测量技术的理论基础和实验依据。以土壤为采集器的积累式地气测量捕获到了3500 m深度下的富锂(钾)卤水层中的信息(图3、4)。该成果对地气测量方法技术及大深度锂矿体的探测,具有重要意义。同时,在新疆卡鲁安、镜儿泉、红岭及湖南仁里等地进行了找矿信息的提取和验证,均取得了良好的示范效果。LB技术的特点是,根据矿区土壤中稀有元素内生组

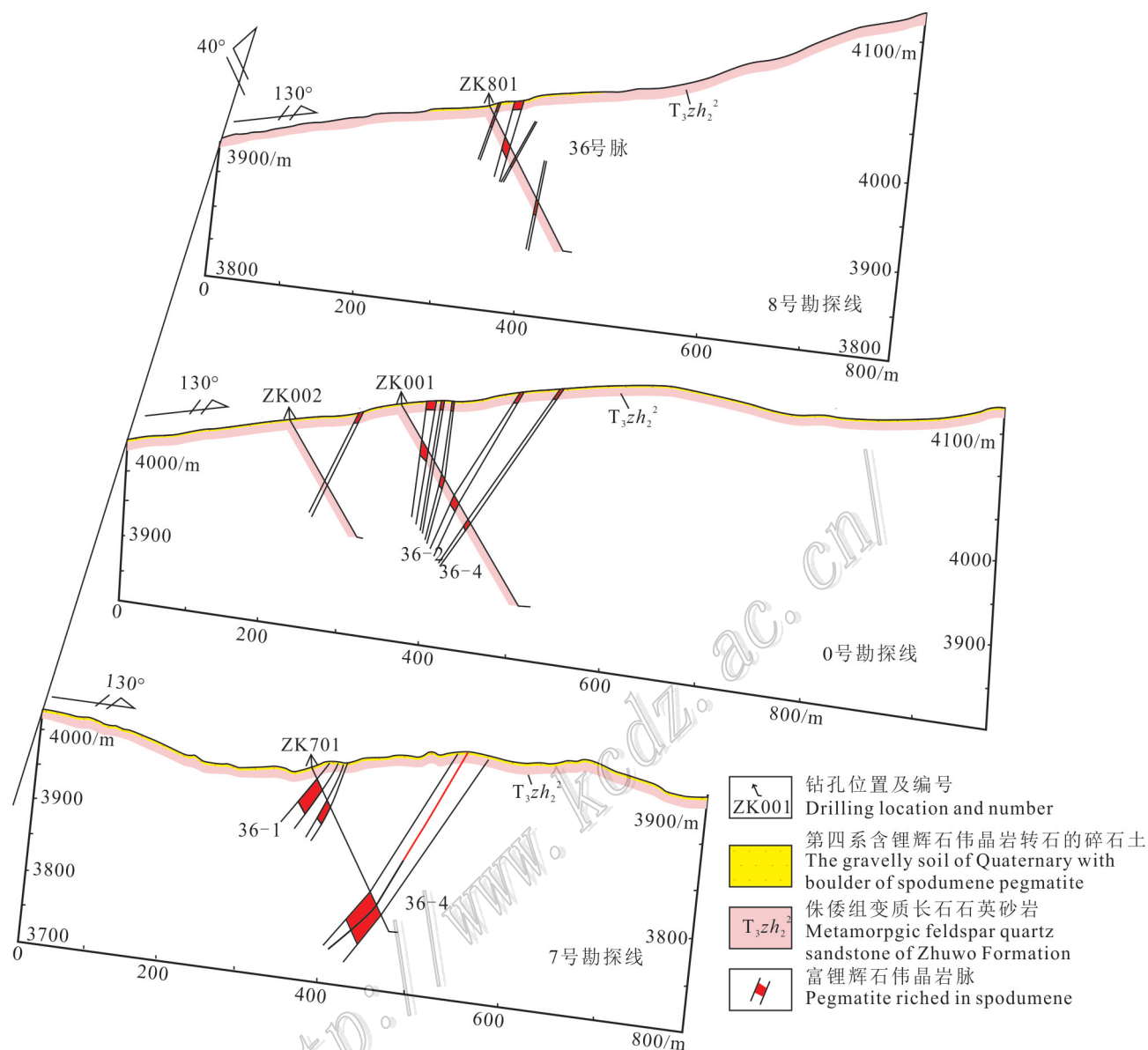


图2 四川马尔康加达矿区36号脉群联合勘探线剖面示意图

Fig 2 Exploration line profile of No.36 vein group in Maerkang Jiada mining area, Sichuan Province

分/外生组分比值高的特点,选择中性盐和去离子水等弱提取剂,选择性提取Li等稀有金属的水溶态和吸附态元素(初始态),建立了以土壤金属活动态提取为主,地气测量和植物地球化学测量为辅的深穿透地球化学综合找矿方法,可以有效地指示不同埋深隐伏矿体的存在,并提出了最佳的提取技术参数,从而为在残坡积物、高背景覆盖区寻找隐伏稀有金属矿体提供技术支撑。利用LB技术在四川甲基卡的X03号脉、804、54、烧炭沟等地均取得了丰富的信息。

2.4 形成了立体化的探测技术方法组合,弥补了传统方法的不足

在近十年的锂矿找矿实践中,由中国地质科学院矿产资源研究所牵头的“三稀团队”积累了空天地一体化的调查技术方法,包括利用遥感资料圈定靶区到直接圈定矿脉,包括利用野外快速分析测试技术方法组合(由国家地质实验测试中心协助、地质调查项目支持)快速梳理异常区,也包括利用牛粪等生物找矿方法来开展绿色勘查,但深部的找矿信息还需要深入实践来积累。项目刚好弥补了前期之不

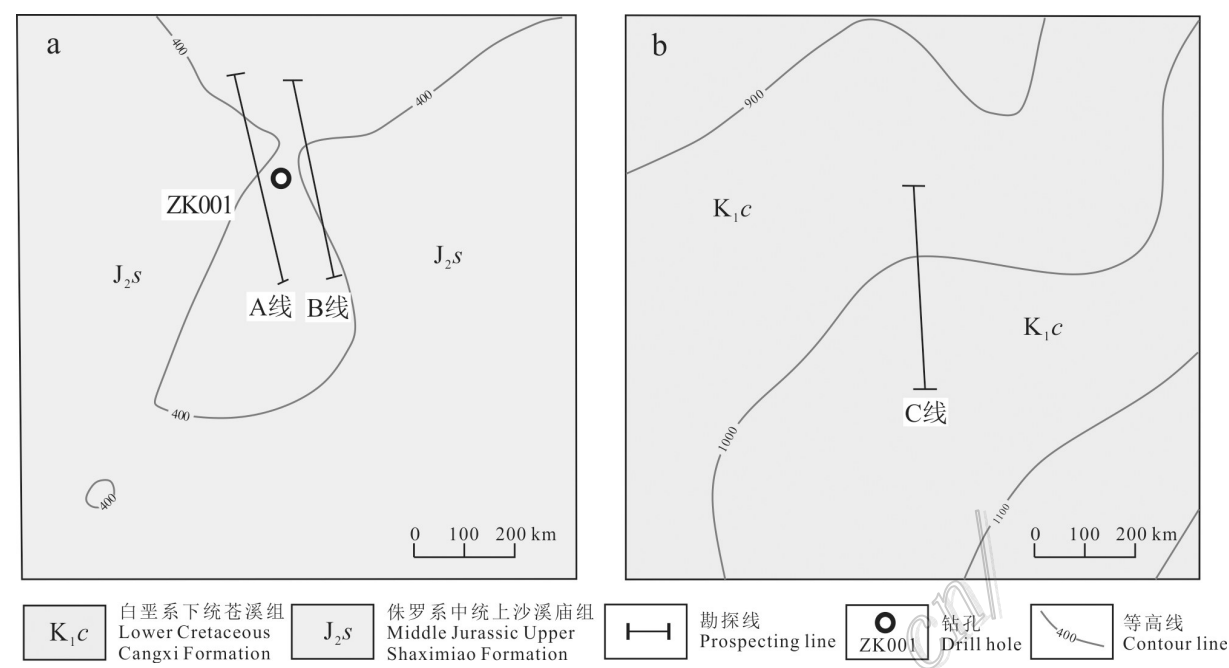


图3 川东北黄金口研究区(a)及背景区(b)地气测量部署图
Fig 3 Geogas survey deployment map (a) and background area(b) of Huangjinkou study area in northeast Sichuan

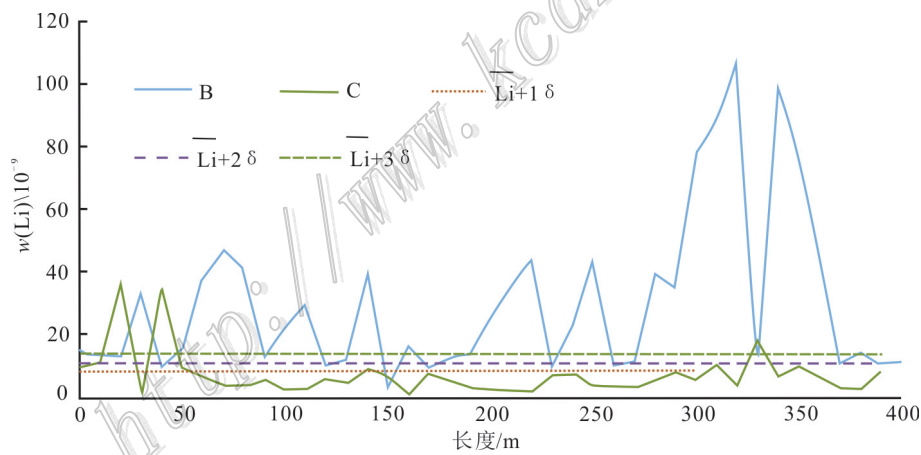


图4 川东北黄金口B、C测线土壤吸附积累式地气测量锂含量对比
Fig. 4 Comparison of lithium content measured by soil adsorption accumulation geogas in Huangjinkou B and C line, from northeast, Sichuan

足,形成了不同类型锂矿立体探测的技术方法组合(包括地表的填图方法和深部的地气测量方法等),具有一定的推广价值。

项目组探索出一套在第四系覆盖但又有伟晶岩转石分布地区的填图找矿方法——“3定2参”1:2000伟晶岩转石填图法(刘善宝等,2020)。即:定伟晶岩转石类型、尺度、密度,参考矿区内伟晶岩

脉产状和地形条件。该方法可以快速有效地识别伟晶岩转石的类型(是冰碛物还是坡积物,是原地还是半原地或异地,等),进而确定第四系覆盖区伟晶岩脉的类型、产状及规模,可为钻探工程部署提供依据。2019年在甲基卡经8个钻孔的验证,在日西柯第四系覆盖区发现16条花岗伟晶岩脉,其中锂辉石伟晶岩脉10条,实现了新的找矿突破。这一方法同

样适用于可尔因矿集区,并指导2019年“松潘-甘孜成锂带锂铍多金属大型资源基地综合调查评价”项目在上述2个地区实施钻探验证,初步探获新增氧化锂资源量超过 20×10^4 t(相当于2个大型锂辉石矿床),值得进一步推广应用。

项目组建立了四川甲基卡、新疆卡鲁安锂矿2个硬岩型锂矿深部及外围勘查的技术方法组合(杨荣等,2020;付小方等,2019;2021)。即,采用地球化学测量和遥感铝羟基蚀变矿物异常圈定靶区,通过地质填图、路线调查寻找矿体(脉)露头,通过物化探(植物、地气)剖面测量定位或寻找(隐伏)含矿伟晶岩脉,通过电阻率法(高密度电法)判断矿脉的产状及延深情况,通过钻探工程来控制矿体的实际情况并为资源量计算提供依据。因此,硬岩型锂矿的综合勘查技术方法体系可归纳为:地质填图+化探异常检查+化探剖面测量+AMT测量+遥感铝羟基蚀变矿物异常圈定靶区+工程揭露+钻探验证。该技术方法体系值得推广到其他矿区,可为找矿突破提供借鉴。

在黄金口示范区,发现ZK601钻孔3387~3402 m深的雷口坡组断裂破碎带中,存在含锂达201.5 mg/L的卤水,对应于一系列的地质、地球物理方面的标志,包括:白云岩;井涌、井漏、放空;Cl⁻上升;岩芯有孔洞、裂隙,碎块,卤浸、返潮、盐霜;岩芯孔隙度4.00%,含水率0.55%。测井曲线表现为:中自然伽玛值,低密度,低电阻率值,中钾含量,低钍含量;该井段以上的自然电位曲线与下部的曲线出现基线偏移,其下部电位电阻率基线值也高于上部井段。含矿卤水的找矿标志为:低GR(自然伽马)、低Rt(地层电阻率)、低DEN(补偿密度)和高AC(声波)、高CNL(补偿中子)。对ZK001的钻孔泥浆水进行了Li含量的系统测定,发现在多个深度出现Li的异常(图5),而Mg/Li的低值并不在膏盐层,如500 m和900 m深度上下也应该注意。其岩屑锂同位素组成也显示,砂泥岩明显小于硬石膏层(高娟琴等,2019)。项目组提出了断裂裂隙控制含锂卤水分布的新认识(前人认为属于层控),对大沙坝背斜、铁山坡背斜、黄家湾背斜及罗家坪背斜进行剖析,认为三叠系富锂钾卤水受断裂带控制,为裂隙-孔隙型卤水;断层交汇处,储卤层裂缝极为发育,呈角砾状,见不规则溶洞;储卤空间大小主要受断裂及脆性储卤体厚度的双重控制。据此估算黄金口背斜南段深部卤水锂金属资源量为5.26万t。将构造裂隙“控卤”的认识推

广到四川自贡市邓井关一带,并在整个四川盆地圈出黄金口、平落坝、蓬莱、自贡、龙女寺、卧龙河等6个远景区,对宣汉-达州、南充-遂宁、乐山、泸州4个地区的三叠系中卤水LiCl资源量进行了预测,合计>500万t,推测整个四川盆地可能达1000万t。

2.5 地质样品制备的自动化与精细化,为信息化智能化研究矿样提供了保障

自主研发了地质样品前处理的仪器设备,大大提高了工作效率,也提升了中国地质样品加工处理的自动化水平和精细化程度。其核心技术包括:岩石样本的磨平抛光夹具及岩石样本制作方法、岩石样本切割设备及岩石样本制样方法、岩石样本磨平抛光加载装置制样系统及制样方法、岩石薄片抛光装置、用于岩石薄片的高效研磨抛光装置、岩石样本磨平抛光加载装置及岩石样本制样系统。尤其在薄片抛光方面,可以同时实现3个薄片的半自动化磨制,且厚度均一。已申报专利6项,获批5项。

3 深部找矿发现

3.1 探讨了国内外新类型、新层位锂资源的分布及赋存状态,指出了新方向

项目组对贵州与铝土矿有关的、西南地区广泛分布的与黏土岩、绿豆岩及砂泥岩类沉积岩有关的、西南“三江”地区与热泉有关的3种新区、新类型锂矿开展了系统调查和研究,查明了锂的赋存状态和分布规律,指出了新类型、新层位找锂的新方向。

根据“多旋回深循环内外生一体化”成矿理论,含锂盆地周边的山脉都有可能是锂的来源之一,不妨寻找硬岩型的锂矿,而含锂地质体剥蚀出露地区的盆地中也应该寻找卤水型锂矿存在的可能性。这样,在华南大量含锂花岗岩出露地区的山间盆地,如江西的吉泰盆地、周田盆地、湖南的衡阳盆地及湖北的江汉盆地,都可能存在卤水型锂矿;青海柴达木盆地是中国稀有金属最富集的沉积盆地,其周边的造山带很有可能存在含锂的地质体乃至锂矿体;四川龙门山造山带两侧不同类型锂矿的存在(四川盆地三叠系含卤水锂,松潘-甘孜造山带三叠系作为成矿母岩的源岩),可能存在内在的成因联系或者深层次的联系。

在新疆阿尔泰成矿省,由浅表找矿转向深部探测已经成为趋势,而深部探测的方向可定为:以脉找层;脉越多地下室可能越大,但矿种可能会变化。在

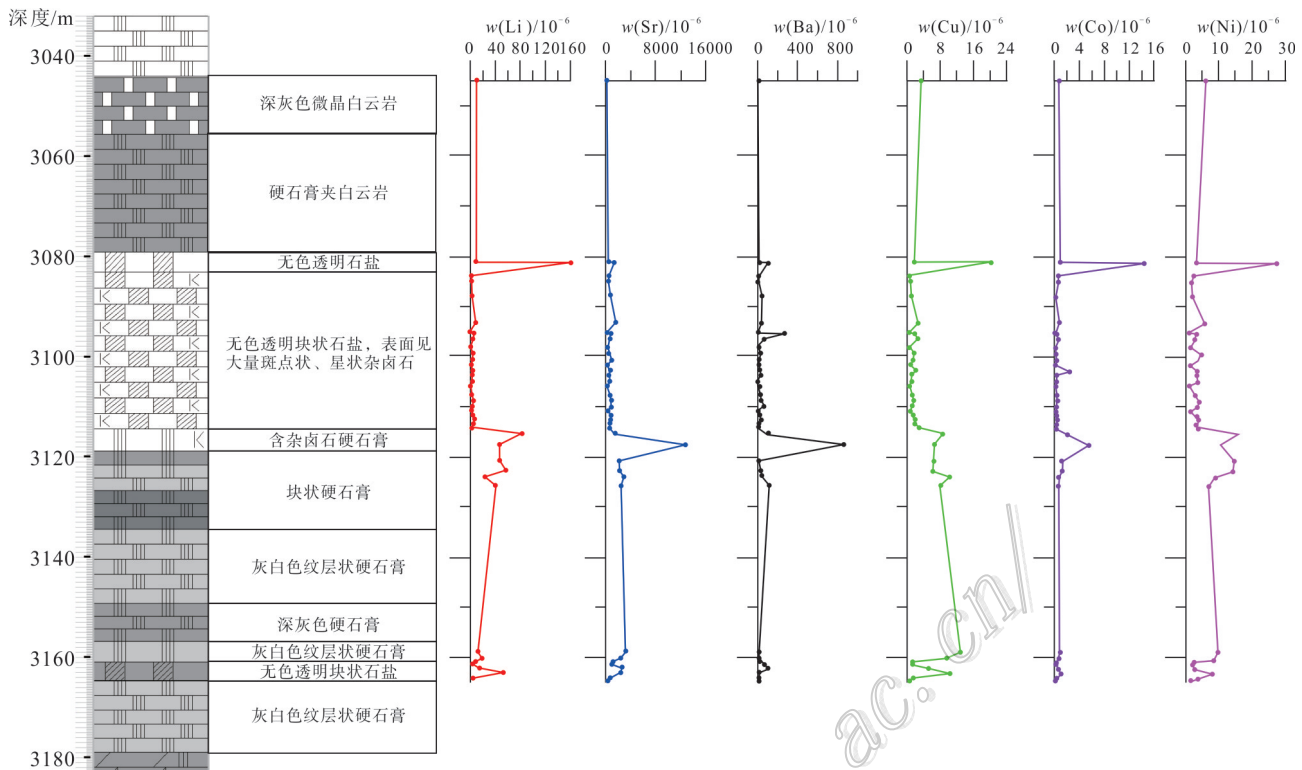


图5 川东北黄金口 ZK001 雷口坡组膏盐段部分微量元素含量分布图

Fig. 5 Distribution of some trace elements in gypsum salt section of Leikoupo Formation zk001, Huangjinkou, northeastern Sichuan

中南地区的幕阜山矿集区,仁里伟晶岩型铌钽矿的发现,就是打破了传统伟晶岩型矿脉“细、小、散”的思想禁锢而取得突破的。

3.2 三个示范区取得实质性进展,为大型锂资源基地的建设提供了资源保障

在新疆卡鲁安示范区,项目组采用地表追索和物化探异常重新圈定了卡鲁安示范区内 650、806、807 等含矿脉,估算了资源量。基本查明深部控矿构造与穹隆关系密切,807、805 及 650 等矿脉可能围绕岩体深部展布;通过 191 个点的地气测量和 231 个点的土壤 XRF 测量,获得 806 号矿脉延深超过 200 m 的证据,推断深部仍有矿化。初步查明 801 与 806、650 与 811 及其他矿脉在深部可能相连,802、803、804 与 805 等原先断断续续分布的矿脉有可能属于同一条矿脉,深部相连。其他脉组也有类似情况,从而极大地拓展了资源前景。这些脉体以往已评价探获 Li_2O 资源量 6.76 万 t,本次新增(334)类 Li_2O 资源量 25.7 万 t(因水源地保护而无法钻探查证),为建设大型锂矿勘查开发基地提供了资源保障;还圈定别

也萨麻斯和诺干-库尔其木克找矿远景区 2 处,提交找矿靶区 6 处。此外,将卡鲁安式锂矿的成矿模式推广到西昆仑的大红柳滩工作区并开展钻探验证,取得新突破。新疆有色集团通过 7 个钻孔(2341.38 m)的验证,在大红柳滩初步探获控制+推断 Li_2O 资源储量 57.61 万 t,达超大型规模。

在四川甲基卡示范区,利用中国地质调查局的调查项目,物化探与钻探工作相结合查证了鸭柯柯、麦基坦南、日西柯、哲西措 4 处靶区和扎乌龙远景区的异常,估算甲基卡 4 个靶区合计氧化锂资源量 25.77 万 t(带钻),扎乌龙远景资源量 58.54 万 t(未带钻)。中国地质科学院矿产资源研究所自筹经费在甲基卡日西柯靶区进行验证,单孔钻探深度 528.78 m,揭露到矿脉 3 条,累计视厚 13.91 m。将甲基卡的勘查模型推广到马尔康工作区,并在加达和加达南 2 个矿区取得了找矿新突破。

在卤水型锂矿示范区,项目组对四川盆地深部富锂卤水的成矿规律进行了研究,提出了“构造裂隙控卤”的新认识,结合对 13 个储卤构造的研究,预测

氯化锂资源量 851.48 万 t(折合金属锂资源量为 139.36 万 t)。此外,四川盆地还有约 300 个类似的构造尚无资料或尚未开展类似工作,前景未明。在西藏盐湖区,已勘查的矿床有扎布耶盐湖、当雄错、鄂雅错、拉果错、麻米错、捌千错、查波错、扎仓茶卡、结则茶卡、龙木错等 10 个。结合以往地质调查的资料,根据湖水化学成分、盐湖面积和推测的深度预测氯化锂资源/储量共计 1416.23 万 t(折合金属锂 231.9 万 t)。其他盐湖尚未开展勘查工作,根据已有资料,卤水锂含量达到边界工业品位的盐湖有 68 个,预测氯化锂资源量 455.25 万 t(折合金属锂 74.5 万 t)。

3.3 圈定了一批成矿远景区和找靶区,为保障国家锂资源安全提供了后备基地

在全国范围内,硬岩型锂矿的远景区主要分布在阿尔泰造山带、东天山-北山造山带、西昆仑造山带、阿尔金造山带、柴达木北缘造山带、松潘-甘孜造山带、西南三江造山带、秦岭造山带、大兴安岭造山带、长江中下游和南岭造山带,而造山带之间的盆地可以作为卤水型锂矿的远景区。在这些小比例尺的远景区可以进一步圈出中、大比例尺的远景区。比如,在松潘-甘孜成矿带中除了甲基卡仍然是 1 个具有找矿远景的矿集区之外,还可以区分出马尔康-金川可尔因、石渠扎乌龙和九龙赫德-三岔河等 3 个远景区。在远景区的基础上可以进一步梳理出靶区,比如,在新疆阿尔泰成矿省北阿尔泰成矿带的哈龙矿集区,围绕哈龙岩体(不一定跟哈龙岩体直接有关)的远景区、靶区有几十个,包括卡鲁安-库卡拉盖、柯鲁木特、萨依肯布拉克、虎斯特、别也萨麻斯及可可托海等,而卡鲁安-库卡拉盖远景区就有几十条伟晶岩脉值得进一步钻探验证。

本次对新类型的锂矿远景区也进行了研究,重点在扬子地台成铝区圈出 4 个伴生锂远景区(龙门山-大巴山、康滇隆起、滇东-川南、江南隆起西段)和 5 个伴生锂潜力区(盐源-丽江、滇中、渝南-黔北、黔中、桂中北),其中贵州的新民铝土矿值得进一步工作。对西南能矿集团在新民铝土矿区钻探的 13 300 m 岩芯进行了系统研究,补充测试了锂的含量,并对其中 5 个矿段伴生于铝土矿区的锂资源量进行了计算,获得的氧化锂(Li_2O)资源量为 30.2 万 t。资源量级别可达 333 控制程度,规模达到大型。

3.4 构建了锂矿深部探测的工作方法体系和技术流程,具有现实意义和推广价值

本次工作遵循“点面结合,面中求点,以点带面,

由浅入深”的工作原则,遵循“规律定向(不同的类型,不同的规律)→化探定性(不同的组合,不同的分带)→物探定位(不同的条件,不同的深度)→钻探验证(综合各方面)”的工作思路,以锂资源基地为目标,在成矿规律研究和靶区优选的同时,开展新疆和四川 2 个硬岩型锂矿区及 1 个卤水型锂矿区的试点示范,既取得了技术方法的创新,也取得了理论研究的创新,二者相辅相成,为锂能源金属资源基地的建设提供了深部找矿信息,为取得下一步找矿突破奠定了基础。每个示范区既有典型矿床的解剖等理论方面的研究,也有深部探测方法的实践,参加单位均是产学研紧密结合,保障了目标任务的实现。

4 结 论

本项目立足于理论创新、方法创新与思路创新,通过“以锂找锂”等技术创新,开展了锂矿深部地质的综合探测,建立了甲基卡式和卡鲁安式及黄金口式不同类型锂矿的成矿模式与勘查模型,综合评价了 3 个示范区的深部资源潜力,并结合其他项目实施异常查证,实现了找矿突破,开拓了锂作为能源金属的找矿新领域,为引领战略性新兴产业的发展提供了资源保障和技术示范。

项目从能源金属的角度,以硬岩型和卤水型为重点,以川西甲基卡、北疆卡鲁安、川东北黄金口为核心,科学厘定了锂矿的优势类型,圈定了靶区和远景区。从锂本身既是特殊用途的战略资源其同位素又可示踪找矿的实践出发,结合深部探测验证,查明锂矿资源潜力及其垂向分带规律,将适合于不同类型锂矿的深部探测技术方法组合应用到靶区和远景区,通过典型试点,产学研结合,不但取得了找矿突破,为大型锂矿能源资源基地的勘查与建设提供示范。

“以锂找锂”理论发端于四川甲基卡,应用于四川加达、可尔因加达等地区,并取得了成功。实践证明,根据地表填图查明锂同位素组成的平面变化规律来示踪成矿物质的运移轨迹,明确找矿方向,有助于勘探;找到锂矿体之后进一步查明锂同位素的空间变化规律,根据锂同位素的立体组成及其变化趋势可以预测深部隐伏矿体,为深部探测与全方位的勘探提供依据,同时也为锂资源的高质量开发利用提供依据。总体上,卤水型锂矿富集 ^7Li ,而伟晶岩型锂矿富集 ^6Li ,四川甲基卡、可尔因加达和党坝是

目前已知世界上最富集 ${}^6\text{Li}$ 的矿床,值得进一步从能源金属高端开发利用的角度来深入评价其科学价值、经济价值和战略价值。

总之,锂作为21世纪的能源金属,是影响战略性新兴产业发展所必须的关键金属,是“从根本上解决能源问题”的可控核聚变的关键金属。本项研究从能源金属的角度,将锂资源的前瞻性研究与锂矿找矿的实践工作密切结合起来,取得了一系列成果,为大型锂矿资源基地的高端建设与锂资源,尤其是锂同位素资源的高端开发利用提供了科学依据,积累了实践经验。实现党中央国务院关于“碳达峰”、“碳中和”的目标和庄严承诺,能源结构调整是关键,锂能源金属将在能源结构调整中发挥重要作用。今后,我们将继续坚持以科技创新为引领,不断探索,使锂能源金属在“彻底改变能源结构”,保障国家安全方面发挥更大的作用!

致谢 感谢所有对“锂能源金属矿产地深部探测技术示范项目”项目给予支持的领导和技术人员,对审稿人提出的宝贵意见表示感谢。

References

- Dai H Z, Wang D H, Liu L J, Yu Y and Dai J J. 2019. Geochronology and geochemistry of Li(Be)-bearing granitic pegmatites from the Jiajika super large Li-polymetallic deposit in western Sichuan, China[J]. *Journal of Earth Science*, 30(4): 707-727.
- Ding K, Liang T, Yang X Q, Zhou Y, Feng Y G, Li K, Teng J X and Wang R T. 2019. Geochronology, petrogenesis and tectonic significance of Dahongliutan pluton in western Kunlun orogenic belt, NW China[J]. *Journal of Central South University*, 26(12): 3420-3435.
- Feng Y G, Liang T, Zhang Z, Wang Y Q, Zhou Y, Yang X Q, Gao J G, Wang H and Ding K. 2019. Columbine U-Pb geochronology of Kaluan lithium pegmatites in northern Xinjiang, China: Implications for genesis and emplacement history of rare-elements pegmatites[J]. *Minerals*, 9(8): 456.
- Zhang H J, Tian S H, Wang D H, Li X F, Liu T, Zhang Y J, Fu X F, Hao X F, Hou K J, Zhao Y and Qin Y. 2021. Lithium isotope behavior during magmatic differentiation and fluid evolution in the Jiajika granite - pegmatite deposit, Sichuan, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 134.
- Xu Z Q, Liang B, Geng Y, Liu T and Wang Q B. 2019. Extraction of soils above concealed lithium deposits for rare metal exploration in Jiajika area: A pilot study[J]. *Applied Geochemistry*, 107: 142-151.
- Feng Y G, Liang T, Linnen R, Zhang Z, Zhou Y, Zhang Z L and Gao J G. 2020. LA-ICP-MS dating of high-uranium columbite from No. 1 pegmatite at Dakalasu, the Chinese Altay orogeny: Assessing effect of metamictization on age concordance[J]. *Lithos*, 362-363.
- Feng Y G, Liang T, Yang X Q, Zhang Z and Wang Y Q. 2019. Chemical evolution of Nb-Ta oxides and cassiterite in phosphorus-rich albite-spodumene pegmatites in the Kangxiwa-Dahong liutan pegmatite field, western Kunlun Orogen, China[J]. *Minerals*, 9(3): 166.
- Fu X F, Huang T, Hao X F, Zou F G, Xiao R Q, Yang R, Pan M, Tang Y and Zhang C. 2019. Application of comprehensive prospecting model to rare lithium metal exploration in Jiajika concealed ore deposit[J]. *Mineral Deposits*, 38(4): 751-770(in Chinese with English abstract).
- Gao J Q, Yu Y, Zhong J A, Liu Z, Zhang S and Pang B. 2019. Geochemical and Li-bearing characteristics of fluids from borehole ZK001 in Huangjingkou anticline of the northeastern Sichuan, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 41(2): 197-208. (In Chinese)
- Geng Y, Liang B, Xu Z Q, Wang Q B, Liu T and Hu S J. 2019. Neutral salt solution extraction of mobile forms of metals in soils and its indication of concealed orebody: A case study of the Jiajika rare metal deposits[J]. *Geological Journal of China Universities*, 25(1): 5-57(in Chinese with English abstract).
- Ju P C, Wang X L, Wang Z T, Liu X F, Zhong J A and Zhang Z M. 2020. Characteristics and geological significance of the Triassic Mungbean rocks in the Wenquan town area, northern Chongqing[J]. *Geoscience*, 34(3): 431-449(in Chinese with English abstract).
- Li X F, Zhang Y J and Tian S H. 2019. Application of lithium isotopes in genetic study of pegmatite deposits[J]. *Geology in China*, 46(2): 419-429(in Chinese with English abstract).
- Liu T, Liang B, Xu Z Q, Wang Q B and Geng Y. 2019. The experimental study of deep-penetrating geochemical methods in Jiajika rare metal deposits in western Sichuan[J]. *Advances in Geosciences*, 9(4): 301-309 (in Chinese with English abstract).
- Liu T, Liang B, Xu Z Q, Wang Q B and Geng Y. 2019. The experimental study of Deep-Penetrating geochemical methods in Jiajika rare metal deposits in western Sichuan[J]. *Advances in Geosciences*, 9(4): 301-309(in Chinese with English abstract).
- Wang Q B, Liang B, Liu T, Xu Z Q and Geng Y. 2020. Detection of concealed ore bodies in Jiajika rare metal ore field using geogas prospecting technology[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 39(2): 85-93(in Chinese with English abstract).
- Feng Y G, Wang Y Q, Zhang Z, Liang T, Zhou Y, Gao J G and Teng J X. 2019. Geochemistry of triphylite in Dahongliutan lithium pegmatites, Xinjiang: Implications for pegmatite evolution[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1405-1421(in Chinese with English abstract).
- Guo W M, Ma S C, Sun Y, Zhao Z, Zhong H R and Yao L S. 2019a. Characteristics and significance of rare metal mineralization in hot-springs of Tengchong area, Yunnan[J]. *Acta Geologica Sinica*,

- 93(6): 1321-1330(in Chinese with English abstract).
- Guo W M, Wang D H, Li P, Li J K, Shu Z M, Zhang W S and Li C. 2019b. Sb-Li assemblages: Rare assemblages of mineralization and the occurrence of lithium[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1296-1308(in Chinese with English abstract).
- Li S, Liang T, Gao J G, Zhou Y, Ren W Q, Li C, Ding L and Chen Y K. 2018. Study on characteristics and metallogenic age of beryllium deposit in Askart, Xinjiang[J]. *World Nonferrous Metals*, 23: 110-111(in Chinese with English abstract).
- Liu S B, Wang C H, Wang D H, Dai H Z, Ma S C, Yu Y, Pan M, Hao X F and Yang R. 2020. The “3D2R-BP” large scale mapping method for blocks of pegmatite in the Jajika deposit, western Sichuan, and significance of its application in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Geological Sinica*, 94(1): 326-332(in Chinese with English abstract).
- Long K S, Fu Y, Chen R, Ye Y M, Yan S and Chen M Z. 2019. The REE enrichment mechanism of bauxite deposits in the northern Guizhou: A case study of the Xinmin bauxite deposit[J]. *Acta Geological Sinica*, 39(4): 443-454(in Chinese with English abstract).
- Ma S C, Wang D H, Liu S B, Wang C H, Dai H Z, Rao K Y, Ding X P, Zhu H Y, Deng Z Q and Guo W P. 2020. The application of comprehensive prospecting methods on the hardrock type lithium deposit—a case study of the Jiada lithium mine in the Maerkang rare metals ore field[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(8): 2341-2353 (in Chinese with English abstract).
- Ma S C, Wang D H, Sun Y, Li C and Zhong H R. 2019. Geochronology and geochemical characteristics of lower-middle Triassic clay rock and their significances for prospecting clay-type lithium deposit[J]. *Earth Science*, 44(2): 427-440(in Chinese with English abstract).
- Sun Y, Gao Y, Wang D H, Dai H Z, Li J and Zhang L H. 2017. Zircon U-Pb dating of ‘mung bean rock’ in the Tongliang area, Chongqing and its geological significance[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 36(6): 649-658(in Chinese with English abstract).
- Wang C H, Wang D H, Chen C, Liu S B, Chen Z Y, Sun Y, Zhao C H, Cao S H and Fan X J. 2019. Progress of research on the Shiziling rare metals mineralization from Jiuling-type rock and its significance for prospecting[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1359-1373 (in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Liu L J, Dai H Z, Liu S B, Hou J L and Wu X S. 2017. Discussion on particularity and prospecting direction of large and super-large spodumene deposits[J]. *Earth Science*, 42(12): 2243-2257(in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Liu L J, Hou J L, Dai H Z, Yu Y, Dai J J, Tian S H. 2017. A preliminary review of the application of “Five levels+Basement” model for Jiajika-style rare metal deposits[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(5): 001-007(in Chinese with English abstract).
- Wang D H, Sun Y, Liu X F, Tian S H, Dai J J, Liu L J and Ma S C. 2017. Deep exploration technology and prospecting direction for lithium energy metal. *Geological Survey of China*, 5(1): 1-9(in Chinese with English abstract).
- Yang R, Hao X F, Wang D H, Fang J B and Dai H Z. 2020. Effect of geophysical exploration on the pegmatite vein in Jiajika lithium ore field, Sichuan Province: A case study of X03 vein[J]. *Mineral Deposits*, 39(1): 111-125(in Chinese with English abstract).
- Yu F, Wang D H, Yu Y, Liu Z, Gao J Q, Zhong J A and Qin Y. 2019. The distribution and exploration status of domestic and foreign sedimentary-type lithium deposits[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 38(3): 354-364(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 凤永刚, 王艺茜, 张泽, 梁婷, 周义, 高景刚, 腾家欣. 2019. 新疆大红柳滩伟晶岩型锂矿床中磷铁锂矿地球化学特征及其对伟晶岩演化的指示意义[J]. *地质学报*, 93(6): 1405-1421.
- 付小方, 黄韬, 郝雪峰, 邹付戈, 肖瑞卿, 杨荣, 潘蒙, 唐屹, 张晨. 2019. 综合找矿模型在甲基卡隐伏区稀有锂金属找矿中的应用[J]. *矿床地质*, 38(4): 751-770.
- 付小方, 黄韬, 邹付戈, 梁斌, 郝雪峰, 杨荣, 潘蒙, 唐屹. 2021. 甲基卡式锂矿田控矿作用与深部找矿方向[J]. *地质学报*, 95(3): 791-808.
- 高娟琴, 于扬, 仲佳爱, 刘铸, 张塞, 庞博. 2019. 川东北黄金口背斜 ZK001 钻孔流体地球化学及含锂特征[J]. *地球科学与环境学报*, 41(2): 197-208.
- 耿艳, 梁斌, 徐志强, 付小方. 2019. 中性盐溶液提取土壤中金属活动态及其对隐伏矿的指示——以甲基卡稀有金属矿区为例[J]. *高校地质学报*, 25(1): 5-57.
- 郭唯明, 马圣钊, 孙艳, 赵芝, 钟海仁, 姚垒珊. 2019a. 云南腾冲热泉中稀有金属矿化特征及其意义[J]. *地质学报*, 93(6): 1321-1330.
- 郭唯明, 王登红, 李鹏, 李建康, 舒志明, 张文胜, 李超. 2019b. Sb-Li 组合: 罕见的矿化组合及锂的赋存状态[J]. *地质学报*, 93(6): 1296-1308.
- 鞠鹏程, 王训练, 王振涛, 刘喜方, 仲佳爱, 张在明. 2020. 渝北温泉镇地区三叠系“绿豆岩”特征及其地质意义[J]. *现代地质*, 34(3): 431-449.
- 李尚, 梁婷, 高景刚, 周义, 任文琴, 李聪, 丁亮, 陈永康. 2018. 新疆阿斯喀尔特铍矿床特征及成矿时代研究[J]. *世界有色地质*, 23: 110-111.
- 李贤芳, 张玉洁, 田世洪. 2019. 锂同位素在伟晶岩矿床成因研究中的应用[J]. *中国地质*, 46(2): 419-429.
- 刘善宝, 王成辉, 王登红, 代鸿章, 马圣钊, 于扬, 潘蒙, 郝雪峰, 杨荣. 2020. 四川甲基卡锂矿伟晶岩转石分布区“3定2参”大比例尺填图法及其在青藏高原应用的意义[J]. *地质学报*, 94(1): 326-332.
- 刘涛, 田世洪, 王登红, 张玉洁, 李贤芳, 侯可军, 杰肯卡里木汗, 张忠利, 王永强, 赵悦, 秦燕. 2020. 新疆卡鲁安硬岩型锂矿床花岗岩与伟晶岩成因锆石 U-Pb 定年、Hf-O 同位素和全岩地球化学证据[J]. *地质学报*, 94(11): 3293-3320.
- 刘婷, 梁斌, 徐志强, 王秋波, 耿艳. 2019. 川西甲基卡稀有金属矿区深穿透地球化学方法研究[J]. *地球科学前沿*, 9(4): 301-309.
- 龙克树, 付勇, 陈蕤, 叶远谋, 严爽, 陈满志. 2019. 黔北铝土矿稀土元

- 素富集机制——以新民铝土矿为例[J]. 矿物学报, 39(4): 443-454.
- 马圣钊, 王登红, 刘善宝, 王成辉, 代鸿章, 饶魁元, 丁晓平, 朱海洋, 邓子清, 郭玮鹏. 2020. 综合勘查方法在硬岩型锂矿找矿中的应用——以马尔康稀有金属矿田加达锂矿为例[J]. 地质学报, 94(8): 2341-2353.
- 马圣钊, 王登红, 孙艳, 李超. 2019. 我国西南部 T1/T2 粘土岩地质年代学、地球化学特征及其对粘土型锂矿的找矿意义[J]. 地球科学, 44(2): 427-440.
- 孙艳, 高允, 王登红, 代鸿章, 顾文帅, 李建, 张丽红. 2017. 重庆铜梁地区“绿豆岩”中碎屑锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩矿测试, 36(6): 649-658.
- 王成辉, 王登红, 陈晨, 刘善宝, 陈振宇, 孙艳, 赵晨辉, 曹圣华, 凡秀君. 2019. 九岭式狮子岭岩体型稀有金属成矿作用研究进展及其找矿意义[J]. 地质学报, 93(6): 1359-1373.
- 王登红, 刘丽君, 代鸿章, 刘善宝, 侯江龙, 吴西顺. 2017. 试论国内外大型超大型锂辉石矿床的特殊性与找矿方向[J]. 地球科学, 42(12): 2243-2257.
- 王登红, 刘丽君, 侯江龙, 代鸿章, 于扬, 代晶晶, 田世洪. 2017. 初论甲基卡式稀有金属矿床“五层楼+地下室”勘查模型[J]. 地学前缘, 24(5): 1-7.
- 王登红, 孙艳, 刘喜方, 田世洪, 代晶晶, 刘丽君, 马圣钊. 2018. 锂能源金属矿产深部探测技术方法与找矿方向[J]. 中国地质调查, 5(1): 1-9.
- 王秋波, 梁斌, 刘婷, 徐志强, 耿艳. 2020. 应用地气测量技术探测甲基卡稀有金属矿区中的隐伏矿体[J]. 地质科技通报, 39(2): 85-93.
- 杨荣, 郝雪峰, 王登红, 范俊波, 代鸿章. 2020. 四川甲基卡锂矿田伟晶岩脉的地球物理探测效果-以新三号脉(X03)为例[J]. 矿床地质, 39(1): 111-125.
- 于泓, 王登红, 于扬, 刘铸, 高娟琴, 仲佳爱, 秦燕. 2019. 国内外主要沉积型锂矿分布及勘查开发现状[J]. 岩矿测试, 38(3): 354-364.

<http://www.kcdz.ac.cn/>